

АППРОКСИМАЦИЯ СИГНАЛОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК НА НЕФТЕПРОВОДАХ

В.А. Якупов, А.М. Корилов*

Томский политехнический университет

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: jva@elesy.ru, korikov@asu.tusur.ru

Рассмотрены проблемы построения систем автоматического обнаружения утечек, предложены варианты решения задачи доставки обрабатываемых данных в центры их сбора и обработки. Показана целесообразность использования аппроксимации данных для сжатия и фильтрации текущих измерений.

Введение

Развитие транспортной сети нефте- и нефтепродуктопроводов (НПС) сопровождается непрерывным повышением уровня их технической оснащенности, широким внедрением современных средств компьютеризации и автоматизации процессов перекачки. Трубопроводная транспортировка неразрывно связана с выполнением комплекса мероприятий по охране окружающей среды на принципиально новых научно-технических ос-

новах проектирования, строительства и эксплуатации магистральных трубопроводов. Несмотря на очевидные преимущества трубопроводного транспорта при транспортировании нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам, имеет место загрязнение атмосферы, водоемов и почвы. В связи с этим серьезное внимание уделяется сокращению потерь на магистральных трубопроводах. Как правило, потери связаны с нарушением правил эксплуатации, повреждением трубопрово-

дов от коррозии, несвоевременным ремонтом, стихийными бедствиями и участвовавшими случаями несанкционированных врезок в трубопровод с целью хищения нефти и нефтепродуктов [1]. В связи с этим особое значение приобретает внедрение автоматических систем обнаружения утечек в системы диспетчерского контроля трубопроводной транспортировки.

О проблемах построения автоматических систем обнаружения утечек

В настоящее время для обнаружения несанкционированных врезок и утечек на НПС разработано большое количество методов [2], основанных на различных физических законах и явлениях.

Среди многообразия предлагаемых методов, наибольший интерес представляют методы обнаружения утечек, пригодные для создания автоматических систем обнаружения утечек. Например, лазерный газоаналитический, ультразвуковой зондовый, магнитные, тепловые, радиоактивные, визуальные методы неудобны для построения автоматических систем обнаружения утечек, т. к. являются в основном методами активного контроля с привлечением дорогостоящих материалов и устройств. Кроме того, у многих из них имеются погодные ограничения, ограничения по глубине залегания трубопровода и ограничения по применимости в разные времена года.

Основными требованиями, предъявляемыми к системам автоматического контроля НПС, являются: высокая чувствительность; точность определения места утечки; безопасность в эксплуатации; обеспечение контроля трубопроводов большой протяженности; высокая степень надежности, достоверности и автоматизации; экономичность; готовность к работе при любых климатических и погодных условиях; оперативность предоставления результатов анализа данных.

Одним из наиболее пригодных методов для создания автоматической системы непрерывного контроля герметичности трубопровода является метод отрицательных волн давления. В основе метода лежит регистрация фронта волны изменения давления, которая возникает в месте разгерметизации трубопровода. По разнице времени прихода фронта волны на концы контролируемого участка рассчитывается место возникновения утечки.

Данный метод предъявляет высокие требования к измерительным системам и средствам связи. В ряде случаев в силу объективных причин удовлетворение предъявляемых требований не всегда возможно. Поэтому не может быть решена не только задача обнаружения утечек малой интенсивности (до 3 % от текущего расхода) на трубопроводе, но и задача адекватного контроля давления с точки зрения определения критических значений технологического процесса. Эта проблема характерна для

всех методов автоматического непрерывного контроля герметичности трубопровода, которые для получения более точного ответа используют большое количество информации.

Наиболее узким местом в этой проблеме является строгая иерархическая система существующей телемеханики, при которой данные собираются и обрабатываются единым центром. Это приводит к ограничению объемов информации, которая может быть передана к центру, с ростом числа узлов и количества данных для обработки особенно при низкой пропускной способности линии связи.

Одно из решений устранения данного недостатка, не приводящее к большим капитальным затратам, является частичная обработка получаемых массивов данных на месте, что достаточно эффективно решается сегодня путем использования микропроцессорных средств, в частности процессоров обработки сигналов и управляющих контроллеров. При этом диспетчер получает данные, только из выбранного частотного диапазона и временного интервала работы, в то время как весь объем информации обрабатывается предварительно на месте самим контроллером. Остальные данные могут накапливаться в энергонезависимой памяти и при необходимости быть считаны дистанционно или обслуживающим персоналом.

Вопрос обнаружения утечки на фоне технологических помех может быть решен путем объединения датчиков давления в систему, при которой динамика давления будет сопоставляться на различных контролируемых участках. Тогда при соответствующей синхронизации имеется возможность определения местоположения источника всплеска давления и, соответственно, его отнесения к тому или иному типу.

Сложность реализации такого подхода заключается в том, что технические характеристики вычислительной техники контроллерного уровня существенно ниже характеристик ЭВМ диспетчерского уровня, что не позволяет применять эффективные и в тоже время затратные алгоритмы обработки данных. Поэтому в качестве второго решения поставленной проблемы предлагается сократить объем передаваемой информации в центральный пункт сбора и обработки.

В качестве пути решения задачи сокращения объема передаваемых данных предлагается аппроксимация сигнала, представленного массивом данных, на контроллерном уровне и передачи коэффициентов аппроксимации в центр сбора и обработки данных. Такой подход позволит использовать простые и малозатратные алгоритмы аппроксимации на местах и эффективные алгоритмы обнаружения утечек на диспетчерском уровне.

Аппроксимация текущих измерений

Основные трудности при решении задачи аппроксимации состоят в следующем: выбор базиса,

позволяющего представить данные требуемого частотного диапазона; малое количество коэффициентов для представления данных с допустимой погрешностью; реализация алгоритма, работающего в режиме реального времени.

Для систем, функционирующих в реальном времени, важна простота реализации на ЭВМ, поэтому особый интерес представляет полиномиальная аппроксимация для кусочно-постоянных параметров. В данной работе предлагается использование кубических сплайнов дефекта равного двум в качестве базиса алгоритма аппроксимации. В пользу такого решения говорят следующие факты: для кубического сплайна с требованием сопряжения по значению и по первой производной необходимо рассчитать только два коэффициента. Существует несколько реализаций алгоритма, имеющих в основе итерационный подход и способных функционировать в режиме реального времени. К таким алгоритмам можно отнести, например, построение рекуррентного сглаживающего сплайна на основе метода наименьших квадратов [3] или применение алгоритма Гревилля решения систем линейных алгебраических уравнений при постановке задачи в терминах псевдообратных матриц [4].

Рассмотрим подробнее задачу нахождения коэффициентов кубического сплайна. Алгебраический полином представляется в следующем виде:

$$P(t) = c_n t^n + c_{n-1} t^{n-1} + \dots + c_1 t + c_0, \quad (1)$$

поэтому определение коэффициентов c_0, c_1, \dots, c_n сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида

$$c_n t_i^n + c_{n-1} t_i^{n-1} + \dots + c_1 t_i + c_0 \approx y_i, \quad i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Для удобства последующего изложения введем в рассмотрение матрицу A и вектор-столбцы \vec{c} и \vec{y} , определив их равенствами:

$$A = \begin{pmatrix} 1 t_1 & t_1^2 & \dots & t_1^n \\ 1 t_2 & t_2^2 & \dots & t_2^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 t_m & t_m^2 & \dots & t_m^n \end{pmatrix}, \quad \vec{c} = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}, \quad \vec{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix}.$$

Представим систему (2) в векторно-матричной форме

$$A \vec{c} \approx \vec{y}. \quad (3)$$

В общем случае для задачи аппроксимации представленная система (3) будет несовместной. Несовместность системы уравнений (3) обуславливает необходимость обобщения классического понятия «решение СЛАУ». Подход к введению подобного обобщения заключается в том, что задача решения СЛАУ сводится к решению экстремальной задачи: минимизация выбранной количественной меры погрешности аппроксимации. Поскольку решение экстремальных задач существует независимо от того, является ли система (3) совместной или нет, то реализация данного подхода по-

зволяет полностью решить проблему существования решения СЛАУ. При таком подходе, учитывая свойства псевдорешения СЛАУ [5], целесообразно использовать ее псевдорешение, определяемое равенством вида

$$\vec{c} = A^+ \vec{y},$$

где A^+ – матрица, псевдообратная к матрице A .

Среди известных алгоритмов вычисления матрицы A^+ в данной работе предпочтение отдается алгоритму Гревилля. Выбор этого алгоритма целесообразен из-за его рекуррентной структуры, которая позволяет регулировать число вычислений, согласно выбранной точности аппроксимации. Для удобства описания выбранного алгоритма будем рассматривать матрицу A как совокупность вектор-столбцов и введем в рассмотрение последовательность матриц A_j , определяемых равенствами:

$$A_1 = a_1, A_2 = \begin{pmatrix} \downarrow & \downarrow \\ a_1 & a_2 \end{pmatrix}, \dots, A_j = \begin{pmatrix} \downarrow & \downarrow & \dots & \downarrow \\ a_1 & a_2 & \dots & a_j \end{pmatrix}, \dots, A_n \equiv A,$$

где $\downarrow a_j$ – j -й столбец матрицы A , $j = \overline{1, n}$.

Из этих равенств видно, что каждая из матриц A_j составлена из первых j столбцов матрицы A и связана с предшествующей ей матрицей соотношением

$$A_j = \begin{pmatrix} A_{j-1} & \downarrow a_j \end{pmatrix}, \quad j = \overline{2, n},$$

где вертикальная черта отделяет последний столбец матрицы.

Используя приведенную выше последовательность матриц A_j , алгоритм Гревилля можно представить в виде следующей последовательности операций:

$$\begin{aligned} A_1^+ &= \begin{pmatrix} \downarrow \\ a_1 \end{pmatrix}^+ = \begin{pmatrix} \downarrow \\ a_1 \end{pmatrix}^T / \begin{pmatrix} \downarrow \\ a_1 \end{pmatrix}; \\ p_j &= A_{j-1}^+ \downarrow a_j, \quad j = \overline{2, n}; \quad \downarrow q_j = \downarrow a_j - A_{j-1} p_j; \\ \vec{b}_j &= \begin{cases} \begin{pmatrix} \downarrow \\ q_j \end{pmatrix}^T / \begin{pmatrix} \downarrow \\ q_j \end{pmatrix}, & \text{если } \downarrow q_j \neq \vec{0}_m; \\ \begin{pmatrix} \downarrow \\ p_j \end{pmatrix}^T A_{j-1}^+ / \left[1 + \begin{pmatrix} \downarrow \\ p_j \end{pmatrix} \right], & \text{если } \downarrow q_j = \vec{0}_m; \end{cases} \\ B_j &= A_{j-1}^+ - p_j \vec{b}_j; \\ A_j^+ &= \begin{pmatrix} B_j \\ \vec{b}_j \end{pmatrix} \end{aligned}$$

где T – операция транспонирования; (\cdot, \cdot) – операция скалярного умножения векторов; $\vec{0}_m$ – нулевой m -мерный вектор-столбец; \vec{b}_j – вектор-строка размерности m ; A_j^+ – псевдообратная к A_j матрица.

Сущность алгоритма решения задачи аппроксимации таблично заданной функции и реализующих

его операций изложены применительно к случаю, когда в качестве аппроксимирующей функции используется алгебраический полином вида (1).

Следует учитывать, что механизм получения псевдорешений оправдан в случае неравномерной сетки. В случае равномерной сетки процедура получения псевдообратной матрицы существенно упрощается. Рассмотрим это на примере для кубического сплайна дефекта 2. Решение ищется в виде

$$\overset{\downarrow}{c} = A^+ \overset{\downarrow}{y},$$

где

$$\overset{\downarrow}{c} = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}$$

— вектор коэффициентов кубического сплайна; A^+ — псевдообратная матрица к матрице

$$A = \begin{pmatrix} 1 & t_1^2 & t_1^3 \\ 1 & t_2^2 & t_2^3 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_m^2 & t_m^3 \end{pmatrix}; \overset{\downarrow}{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} \text{ — вектор измерений.}$$

Так как временная сетка равномерна, т. е. $|t_{i-1} - t_i| = \Delta t$, то с учетом локализации временного интервала ($t_i = 0$) матрица A принимает следующий вид:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \Delta t & \Delta t^2 & \Delta t^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & (m-1)\Delta t & ((m-1)\Delta t)^2 & ((m-1)\Delta t)^3 \end{pmatrix}.$$

Из условий сопряжения сплайна и его первой производной (c_0 и c_1 известны) получаем систему,

$$A' \overset{\downarrow}{c}' \approx \overset{\downarrow}{y}',$$

где

$$A' = \begin{pmatrix} (\Delta t)^2 (j-1)^2 & (\Delta t)^3 (j-1)^3 \\ \dots & \dots \end{pmatrix}, j = \overline{1, m}; \overset{\downarrow}{c}' = \begin{pmatrix} c_2 \\ c_3 \end{pmatrix};$$

$$\overset{\downarrow}{y}' = \overset{\downarrow}{y} - (c_0 + c_1(j-1)\Delta t), j = \overline{1, m}.$$

По алгоритму Гревилля, учитывая:

$$f_i = (\Delta t)^i \sum_{k=1}^m (k-1)^i,$$

получаем

$$A'^+ = \begin{pmatrix} \left(\frac{1}{f_4} + \frac{f_5^2}{f_4(f_6 f_4 - f_5)} \right) \Delta t^2 (j-1)^2 - \\ - \frac{f_5}{f_6 f_4 - f_5} \Delta t^3 (j-1)^3 - \\ - \frac{f_5}{f_6 f_4 - f_5} \Delta t^2 (j-1)^2 + \frac{f_4}{f_6 f_4 - f_5} \Delta t^3 (j-1)^3 \end{pmatrix},$$

то есть вычисление псевдообратной матрицы сводится к определению f_i . Известно что

$$\sum_{i=1}^{n-1} i^4 = \frac{1}{30} n(2n-1)(n-1)(3n^2-3n-1);$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} i^5 = \frac{1}{12} n^2(2n^2-2n-1)(n-1)^2;$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} i^6 = \frac{1}{42} n(2n-1)(n-1)(3n^4-6n+3n+1).$$

Нетрудно видеть, что число вычислений при определении f_i не изменяется при росте числа измерений, участвующих в аппроксимации, что немаловажно для систем, функционирующих в реальном масштабе времени.

Определение размера массива измерений, подлежащих аппроксимации, определение точки сопряжения сплайнов обусловлено требованиями задачи и выбирается разработчиком исходя из этих требований. Рассмотрим эту задачу на примере применения кубического сплайна для аппроксимации текущих измерений давления для последующей передачи информации по каналам связи и обработки.

Для обнаружения утечек малой интенсивности и определения координаты утечки с погрешностью не более 1 % от длины контролируемого участка необходимо измерение давления с дискретностью порядка 100...120 Гц, разрядность цифро-аналогового преобразователя не менее 24 бит. Организация файлового обмена (не протоколируемые данные телемеханики) между контроллерным уровнем и центром сбора и обработки данных позволит сократить трафик за счет уменьшения избыточности универсальных протоколов передачи данных. Для метода отрицательных волн давления желательно наличие двух датчиков на каждом контрольном пункте для определения направления волнового возмущения, что увеличит объем передаваемых данных с одного контрольного пункта в два раза. Поэтому, если выбрать файловый интервал 180 с и частоту дискретизации 100 Гц, получим, что объем передаваемых данных (без учета сопроводительной информации) составит около 105 Мб.

Выберем число текущих аппроксимируемых данных равное 200 и потребуем выбор точки сопряжения в середине сплайна. При аппроксимации данных кубическими сплайнами, с условием сопряжения по значению и первой производной, при расчете 4 байта на один коэффициент, получим 5,6 Мб. Если учесть, что первые два коэффициента сплайна при меньших степенях рассчитываются по коэффициентам предыдущего сплайна, то в файле достаточно передать только один раз четыре коэффициента, а затем передавать только «старшие» коэффициенты, поэтому объем передаваемых данных сократится до 2,8 Мб.

Таким образом, варьируя количеством аппроксимируемых данных, можно получить требуемый

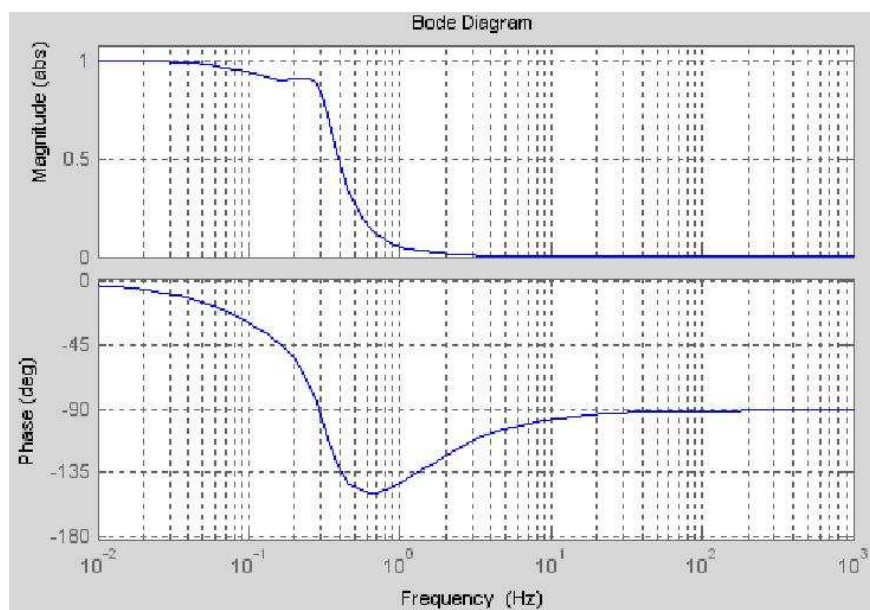


Рисунок. Частотные характеристики сплайн-преобразования

коэффициент сжатия и передавать на обработку максимально возможное количество данных с учетом погрешности, вносимой алгоритмом аппроксимации.

Для представления частотных характеристик сплайнового преобразования с указанными параметрами воспользуемся средствами среды MATLAB 6.5 [6]. Частотные характеристики, представленные на рисунке, свидетельствуют о том, что аппроксимированный сигнал содержит информацию о волновых процессах с частотой 1 Гц и ниже, что соответствует волновым процессам, возникающим при разгерметизации трубопровода.

Очевидно, что с изменением количества точек аппроксимации и выбора точки сопряжения изменятся частотные характеристики сплайн-преобразования.

Заключение

Выбор функциональной структуры автоматической системы обнаружения утечек является важным моментом при решении задач начального этапа разработки, который предопределяет дальнейшее развитие системы. Предлагаемый подход предварительной обработки данных на контроллерном уровне позволяет построить систему, в которой основная работа по их анализу выполняется на диспетчерском уровне. Такое разделение функциональной части системы удобно для применения эффективных и в то же время затратных алгоритмов обработки и анализа данных. В пользу предлагаемого подхода говорит также тот факт, что гибкость систем верхнего уровня позволяет в короткие сроки проводить модификацию и масштабирование, что немаловажно вследствие затратности процесса интегрирования систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольянов А.А. Обнаружение места утечек в магистральных нефтепродуктопроводах с помощью сканирующих импульсов давления: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2004. – 22 с.
2. Гольянов А.А. Анализ методов обнаружения утечек на нефтепроводах // НИС, ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ. Сер. «Транспорт и хранение нефтепродуктов». Вып. 10–11, 2002. – С. 5–14.
3. Кочегурова Е.А. Текущая аппроксимация нестационарных случайных процессов в системах управления на основе рекуррентного сглаживающего сплайна: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1990. – 165 с.
4. Якупов В.А. Кориков А.М. Применение псевдообратных матриц в задачах аппроксимации данных // Молодежь и современные информационные технологии: Труды IV Всеросс. научно-практ. конф. студентов. – Томск, 2006. – С. 154–157.
5. Светлаков А.А. Обобщенные обратные матрицы: некоторые вопросы теории и применения в задачах автоматизации управления процессами. – Томск: Изд-во НЛТ, 2003. – 388 с.
6. Дьяконов В.П. MATLAB 6.0/6.1/6.5/6.5+SP1 Simulink 4/5. Обработка сигналов и изображений. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 592 с.